

DOI: 10.5846/stxb201303150431

彭云玲, 保杰, 叶龙山, 王永健, 燕利斌. NaCl 胁迫对不同耐盐性玉米自交系萌动种子和幼苗离子稳态的影响. 生态学报, 2014, 34(24): 7320-7328.  
Peng Y L, Bao J, Ye L S, Wang Y J, Yan L B. Ion homeostasis in germinating seeds and seedlings of three maize inbred lines under salt stress. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7320-7328.

## NaCl 胁迫对不同耐盐性玉米自交系萌动种子和 幼苗离子稳态的影响

彭云玲\*, 保杰, 叶龙山, 王永健, 燕利斌

(甘肃省干旱生境作物学重点实验室 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070)

**摘要:** 盐胁迫影响植物组织的离子分布, 不同品种间存在差异。以玉米耐盐自交系 81162 和 8723 及盐敏感自交系 P138 为材料, 研究了不同浓度 (0、60、140、220 mmol/L) NaCl 胁迫下萌动期种子和幼苗的不同部位中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  含量以及  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  比值的变化, 旨在探讨不同自交系耐盐性差异的原因。结果表明, 在萌动种子中, 3 个玉米自交系中的  $\text{Na}^+$  积累量表现为种皮>胚>胚乳,  $\text{K}^+$  积累表现为胚>种皮>胚乳; 幼苗中,  $\text{Na}^+$  积累表现为根>茎>叶。随着 NaCl 浓度的增加, 3 个玉米自交系萌动种子和幼苗中的  $\text{Na}^+$  含量逐渐升高, 但是萌动种子中耐盐自交系 81162 和 8723 的  $\text{Na}^+$  增加幅度小于盐敏感自交系 P138,  $\text{Na}^+$  含量小于盐敏感自交系 P138; 幼苗中耐盐自交系 81162 和 8723 的  $\text{Na}^+$  增加幅度大于盐敏感自交系 P138, 幼苗根中  $\text{Na}^+$  含量大于盐敏感自交系 P138; 茎叶中的  $\text{Na}^+$  含量小于盐敏感自交系 P138。随着 NaCl 浓度的增加, 萌动种子和幼苗中的  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量逐渐降低。 $\text{K}^+$  离子在耐盐自交系 81162 和 8723 萌动种子和幼苗中的降低幅度小于盐敏感自交系 P138;  $\text{Ca}^{2+}$  离子在耐盐自交系 81162 和 8723 幼苗中的降低幅度小于盐敏感自交系 P138; 而在萌动种子中 3 个自交系  $\text{Ca}^{2+}$  的流失差异不大。耐盐自交系 81162 和 8723 萌动种子和幼苗中  $\text{K}^+$  含量都大于盐敏感自交系 P138。耐盐自交系 81162 和 8723 的萌动种子和幼苗根中  $\text{Ca}^{2+}$  含量都大于盐敏感自交系 P138; 幼苗叶片中则小于盐敏感自交系 P138。萌动种子和幼苗中  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  均随着 NaCl 浓度的升高而降低,  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  比值表现为耐盐自交系 81162 和 8723 大于盐敏感自交系 P138。耐盐自交系 81162 和 8723 通过调节离子平衡维持萌动种子和幼苗中较高的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  比值从而提高耐盐性。

**关键词:** NaCl 胁迫; 玉米自交系; 萌动种子; 幼苗; 离子稳态

### Ion homeostasis in germinating seeds and seedlings of three maize inbred lines under salt stress

PENG Yunling\*, BAO Jie, YE Longshan, WANG Yongjian, YAN Libin

Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science; Gansu Key Lab of Crop Improvement and Germplasm Enhancement; College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** Salt stress affects ion distribution in plant tissues. These salt-induced changes in ion distribution differ among plant varieties. In this study, we analyzed salt-tolerant inbred lines (8723 and 81162) and a salt-sensitive inbred line (P138) of maize under varying degrees of salt stress (0, 60, 140, 220 mmol/L NaCl) to explore the reasons for differences in salt resistance among the inbred lines. We measured the concentrations of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Ca}^{2+}$  in the testa, embryo, endosperm, root, stem, and leaf tissues, and determined the ratios of  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  in germinating seeds and seedlings. In germinating seeds, the  $\text{Na}^+$  concentration was highest in the testa, followed by the embryo, and then the endosperm; the  $\text{K}^+$  concentration was highest in the embryo, followed by the testa, and then the endosperm. In seedlings,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (31260330, 31301333); 教育部博士点基金 (20126202120001); 甘肃省科技支撑计划项目 (1011NKCA076); 甘肃省干旱生境作物学重点实验室开放课题 (GSCS-2010-10)

**收稿日期:** 2013-03-15; **网络出版日期:** 2014-03-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pengyunlingpyl@163.com

the highest level of  $\text{Na}^+$  was in the root, followed by the stem, and then the leaves; the highest levels of  $\text{K}^+$  were in the root and stem, followed by the leaves. With increasing NaCl concentrations in the salt treatment, the  $\text{Na}^+$  content increased gradually in germinating seeds and seedlings of the three maize lines. In germinating seeds, the range of the increase in  $\text{Na}^+$  content was smaller in the salt-tolerant lines 8723 and 81162 than in the salt-sensitive line P138, and the salt-tolerant lines accumulated less  $\text{Na}^+$  than did the salt-sensitive line. In seedlings, the range of the increase in  $\text{Na}^+$  content was larger in the salt-tolerant lines 8723 and 81162 than in the salt-sensitive line P138, and the salt-tolerant lines accumulated higher levels of  $\text{Na}^+$  in the roots and lower levels of  $\text{Na}^+$  in the stem and leaves. As the NaCl concentration in the salt treatment increased, the  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  contents decreased gradually in germinating seeds and seedlings of the three maize lines. In germinating seeds and in seedlings, the salt-tolerant lines 8723 and 81162 showed smaller ranges of decreased  $\text{K}^+$  contents and contained higher concentrations of  $\text{K}^+$  compared with the salt-sensitive line P138. In seedlings, the salt-tolerant lines 8723 and 81162 showed smaller ranges of decreased  $\text{Ca}^{2+}$  contents compared with the salt-sensitive line P138. However, in germinating seeds, there was no significant difference in the range of decreased  $\text{Ca}^{2+}$  content among the three maize lines. With increasing NaCl concentrations in the salt treatment, the ratios of  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  decreased in germinating seeds and seedlings. The  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  ratio was higher in the salt-tolerant lines 8723 and 81162 than in the salt-sensitive line P138. Germinating seeds and seedlings of the salt-tolerant lines 81162 and 8723 retained higher  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  ratios by adjusting ion homeostasis to improve salt resistance.

**Key Words:** NaCl stress; maize inbred lines; germinating seeds; maize seedlings; ion homeostasis

在我国 0.67 亿  $\text{hm}^2$  耕地中有 10% 为盐渍化土壤,土壤盐渍化已成为限制农作物产量进一步提高的重要环境因子之一<sup>[1]</sup>。玉米 (*Zea mays*) 对盐分中度敏感,耐盐性相对较差<sup>[2]</sup>。因此,深入研究玉米耐盐生理机制,筛选耐盐品种,培育具有一定耐盐能力的玉米,对充分利用盐渍化土地,提高玉米产量具有重要意义。

盐胁迫对玉米的主要伤害是盐离子在细胞内大量累积,导致离子毒害和离子不平衡,特别是  $\text{Na}^+$ 。盐胁迫下  $\text{Na}^+$  大量涌入胞内,不仅破坏细胞中已形成的离子平衡状态,而且影响  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的胞内含量和分布<sup>[3-4]</sup>。 $\text{Na}^+$  对细胞  $\text{K}^+$  的吸收呈现明显竞争性抑制<sup>[5]</sup>;同时高浓度  $\text{Na}^+$  可置换质膜和细胞内膜系统所结合的  $\text{Ca}^{2+}$ ,膜系统完整性被破坏,膜透性增大,细胞物质交换平衡被破坏,导致生理生化代谢紊乱。盐胁迫下细胞内离子平衡破坏的一个典型指标就是  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  降低<sup>[6]</sup>。

种子萌发与早期幼苗生长阶段是决定植物能否在盐渍环境下生长最关键的时期<sup>[7-8]</sup>。国内外学者对盐胁迫下作物幼苗离子含量进行了大量研究<sup>[9-13]</sup>,初步探索出了盐胁迫下作物离子含量的变化规律,但是以不同耐盐品种萌动种子和幼苗为材料共同研究玉米耐盐机理报道较少<sup>[14]</sup>。为此,本试

验以前期筛选出的耐盐玉米自交系 8723、81162 和盐敏感自交系 P138 为材料,在不同浓度 NaCl 溶液处理下,研究不同玉米品种  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  在萌动种子和幼苗中各部分的分布及变化,旨在为玉米耐盐性评价体系的建立和耐盐育种提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

耐盐自交系 8723、81162 和盐敏感自交系 P138<sup>[15]</sup>。其中 8723 来源于引进玉米自交系 8723,81162 来源于 525×掖 107 后代材料,P138 来源于美国杂交种 P78599 的后代材料。

### 1.2 胁迫处理

种子萌发期胁迫处理:精选无破损、大小一致的种子,用 0.5% 的次氯酸钠消毒 10 min,蒸馏水冲洗 3—5 次,用滤纸吸干附着水,置于直径为 12 cm 的培养皿中,双层滤纸作发芽床,每皿 30 粒。分别加入浓度为 0、60、140、220 mmol/L 的 NaCl 溶液,3 次重复。置于培养箱中 25℃ 暗萌发。

幼苗生长期胁迫处理:用 15 cm×13 cm 的营养钵进行幼苗培养,并设置 0、60、140、220 mmol/L 的 NaCl 溶液进行处理,每处理设 3 次重复。100 mL 各对应浓度的 NaCl 溶液与 500 g 已灭菌的蛭石搅拌

均匀后分装于营养钵中。播种前种子用 0.5% 的次氯酸钠消毒 10 min, 蒸馏水冲洗 3—5 次, 然后将种子分别浸泡在 0、60、140、220 mmol/L 的 NaCl 溶液中, 浸泡 12 h 后, 直接播在含有相同盐浓度的消毒蛭石中, 每钵 10 粒。播种后于植物生长室中培养, 生长室的昼/夜温度为  $(25 \pm 2)/(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 每天光照 12 h, 光照强度为  $600 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ , 相对湿度 60%—80%, 定时定量浇水。幼苗在加有不同浓度盐溶液的蛭石中生长 10 d, 对照叶片生长到三叶一心时, 进行各项生长指标的测定。

### 1.3 离子含量测定

将耐盐自交系 8723、81162 和盐敏感自交系 P138 分别在萌发期和幼苗生长期进行胁迫处理。萌发期胁迫处理的种子, 待种子萌动后用 60 mmol/L 的 NaCl 溶液冲洗干净, 将种皮、胚、胚乳分离; 幼苗生长期胁迫处理的种子, 待幼苗长到三叶一心时, 用 60 mmol/L NaCl 溶液冲洗干净, 将根、茎、叶分离, 置  $105^\circ\text{C}$  烘箱中 10 min, 然后于  $80^\circ\text{C}$  下烘 48h。用等离子质谱测定  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  离子的含量。

### 1.4 数据统计与分析

所有试验数据使用统计软件 SPSS16.0 进行处理, 试验结果用平均值  $\pm$  标准偏差 (SD) 表示, 采用 Duncan 进行差异显著性多重比较, 对各处理间的差异显著性进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 萌动种子中 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 含量的变化

如图 1 所示, 萌动种子中, 3 个自交系中不同部位的  $\text{Na}^+$  含量顺序是种皮 > 胚 > 胚乳;  $\text{K}^+$  含量顺序是胚 > 种皮 > 胚乳;  $\text{Ca}^{2+}$  含量顺序是种皮 > 胚 > 胚乳。萌动种子中  $\text{Na}^+$  含量随 NaCl 浓度的增加而增加, 3 个自交系表现相同的上升趋势。与对照相比, 60、140、220 mmol/L NaCl 处理后, 81162  $\text{Na}^+$  含量分别上升 2.82、4.02、6.03 倍; 8723 分别上升 1.88、4.91、5.94 倍; P138 分别上升 2.97、6.35、9.34 倍。由此可见, 萌发期耐盐自交系 81162 和 8723 的  $\text{Na}^+$  积累速度小于盐敏感自交系 P138。耐盐自交系 81162 和 8723 中  $\text{Na}^+$  含量小于盐敏感自交系 P138。随着 NaCl 浓度的增加, 3 个自交系萌动种子中  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量均呈下降趋势。与对照相比, 220 mmol/L NaCl 处理后, 81162 的  $\text{Ca}^{2+}$  含量分别下降 71.76%; 8723 分别下降

68.98%; P138 分别下降 69.34%。81162 的  $\text{K}^+$  含量下降 34.46%, 8723 下降 36.84%, P138 下降 44.31%。由此可见, 萌动种子中  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的流失都比较多, 尤其是  $\text{Ca}^{2+}$ 。但是 3 个自交系中  $\text{Ca}^{2+}$  的流失差异不大; 而  $\text{K}^+$  离子在盐敏感自交系 P138 中的降低幅度大于耐盐自交系 81162 和 8723。除了胚乳中,  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量在耐盐自交系 81162 和 8723 及盐敏感自交系 P138 之间没有差异外, 在胚和种皮中,  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的积累量几乎在每个浓度下耐盐自交系 81162 和 8723 都大于盐敏感自交系 P138。

### 2.2 幼苗中 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 含量的变化

#### 2.2.1 不同浓度 NaCl 胁迫下玉米幼苗 $\text{Na}^+$ 含量的变化

如图 2 所示, 在幼苗中, 3 个玉米自交系  $\text{Na}^+$  含量的顺序是根 > 茎 > 叶; 根和茎中的  $\text{Na}^+$  含量较高, 而叶中含量较低。玉米幼苗中  $\text{Na}^+$  含量随 NaCl 浓度的增加而增加, 3 个自交系表现相同的上升趋势。与对照相比, 60、140、220 mmol/L NaCl 处理后, 81162 的  $\text{Na}^+$  含量上升倍数分别为 0.56、1.19、2.33; 8723 分别上升 0.30、1.77、3.27; P138 分别上升 0.37、1.30、1.65。由此可见, 幼苗生长期耐盐自交系 81162 和 8723 体内  $\text{Na}^+$  积累大于盐敏感自交系 P138, 说明耐盐自交系 81162 和 8723 的耐  $\text{Na}^+$  能力较强, 而盐敏感自交系 P138 的耐  $\text{Na}^+$  能力弱。另外, 根和茎中耐盐自交系 81162 和 8723 中  $\text{Na}^+$  含量大于盐敏感品种 P138, 而叶中盐敏感自交系 P138 中的  $\text{Na}^+$  含量大于耐盐自交系 81162 和 8723。

#### 2.2.2 不同浓度 NaCl 胁迫下玉米幼苗 $\text{K}^+$ 含量的变化

如图 2 所示, 随着 NaCl 浓度的增加, 3 个玉米自交系幼苗中  $\text{K}^+$  含量呈下降趋势。与对照相比, 60、140、220 mmol/L NaCl 处理后, 81162 的  $\text{K}^+$  含量分别下降 6.71%、18.58%、36.55%; 8723 分别下降 9.33%、25.35%、35.40%; P138 分别下降 7.06%、28.21%、40.27%。由此可见, 耐盐自交系 81162 和 8723 幼苗体内的  $\text{K}^+$  含量下降幅度小于盐敏感自交系 P138, 同时耐盐自交系 81162 和 8723 中  $\text{K}^+$  含量大于盐敏感自交系 P138。

不同玉米自交系根茎叶中  $\text{K}^+$  含量下降的幅度也不同。当 NaCl 浓度增至 220 mmol/L 时, 根中  $\text{K}^+$  含量下降幅度 81162 为 45.28%, 8723 为 34.47%,

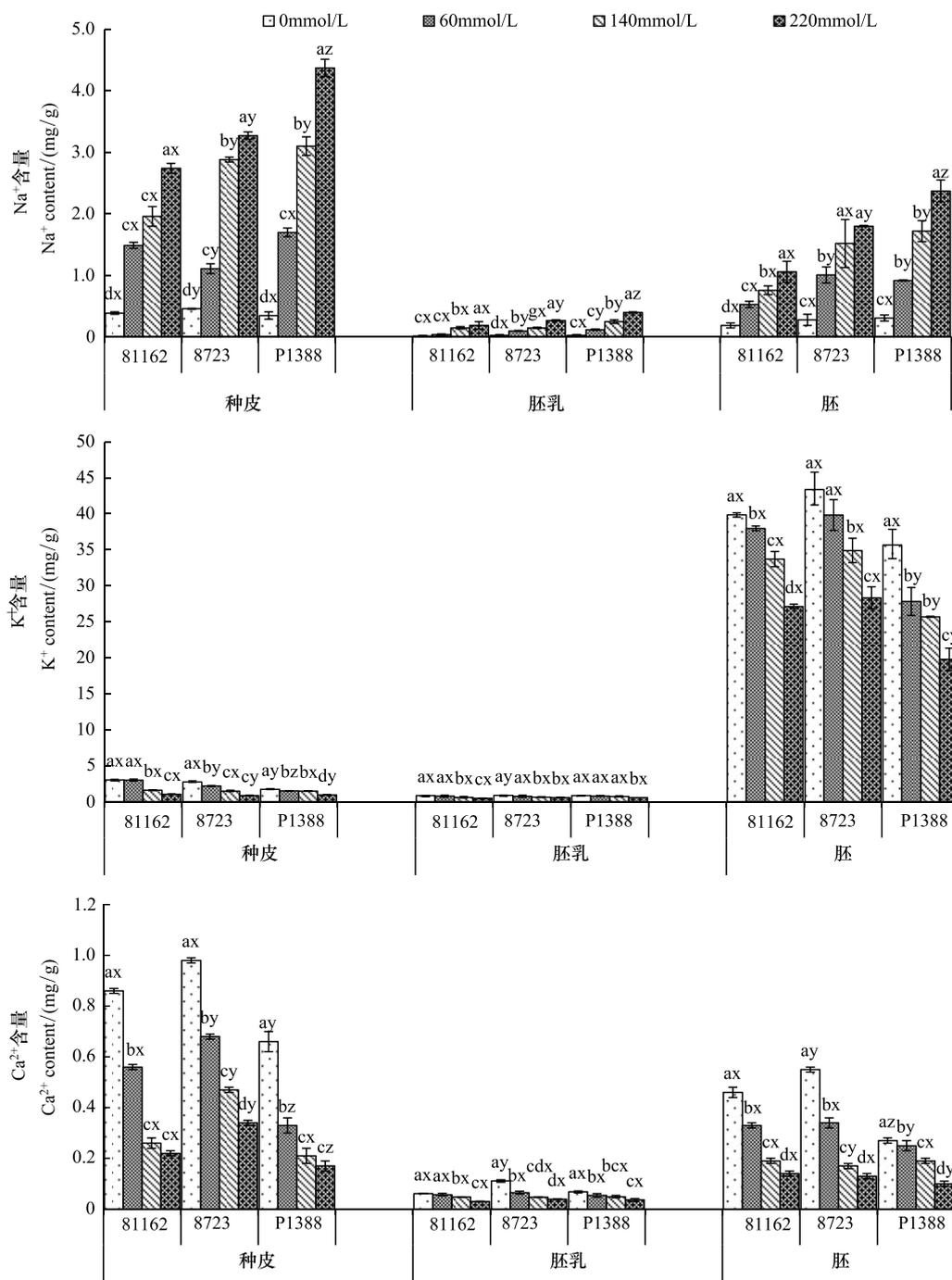


图 1 盐胁迫下不同玉米品种在萌动种子中 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>含量的变化

Fig.1 Changes of Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> and K<sup>+</sup> content in germinating seeds of three maize inbred lines under different NaCl concentrations  
不同小写字母 abcd 表示不同盐浓度下 0.05 水平差异显著,xyz 表示品种间 0.05 水平差异显著

P138 为 28.11%; 茎 K<sup>+</sup> 含量下降幅度 81162 为 26.72%, 8723 为 35.37%, P138 为 43.48%; 叶中 K<sup>+</sup> 含量下降幅度 81162 为 38.24%, 8723 为 36.64%, P138 为 50.60%。由此可以看出,高盐胁迫下耐盐自交系 81162 和 8723 根中 K<sup>+</sup> 含量的降低幅度大于盐敏感自交系 P138,而茎和叶中 K<sup>+</sup> 含量的降低幅度小

于盐敏感自交系 P138。

### 2.2.3 不同浓度 NaCl 胁迫下玉米幼苗 Ca<sup>2+</sup> 含量的变化

如图 2 所示,随着 NaCl 浓度的增加,3 个玉米自交系幼苗中 Ca<sup>2+</sup> 含量呈下降趋势。与对照相比,60、140、220 mmol/L NaCl 处理后,81162 的 Ca<sup>2+</sup> 含量分

别下降 12.48%、31.15%、48.68%；8723 分别下降 19.95%、32.53%、46.92%；P138 分别下降 27.21%、46.63%、62.51%。由此可见，耐盐自交系 81162 和 8723 幼苗体内  $\text{Ca}^{2+}$  含量下降幅度小于盐敏感品种 P138；同时耐盐自交系 81162 和 8723 根茎中  $\text{Ca}^{2+}$  含

量大于盐敏感自交系 P138，但是叶片中则小于敏感自交系 P138。

不同自交系根茎叶中  $\text{Ca}^{2+}$  含量下降的幅度也不同。当 NaCl 浓度达到 220mmol/L 时，根中  $\text{Ca}^{2+}$  含量的下降幅度 81162 为 53.17%，8723 为 56.06%，P138

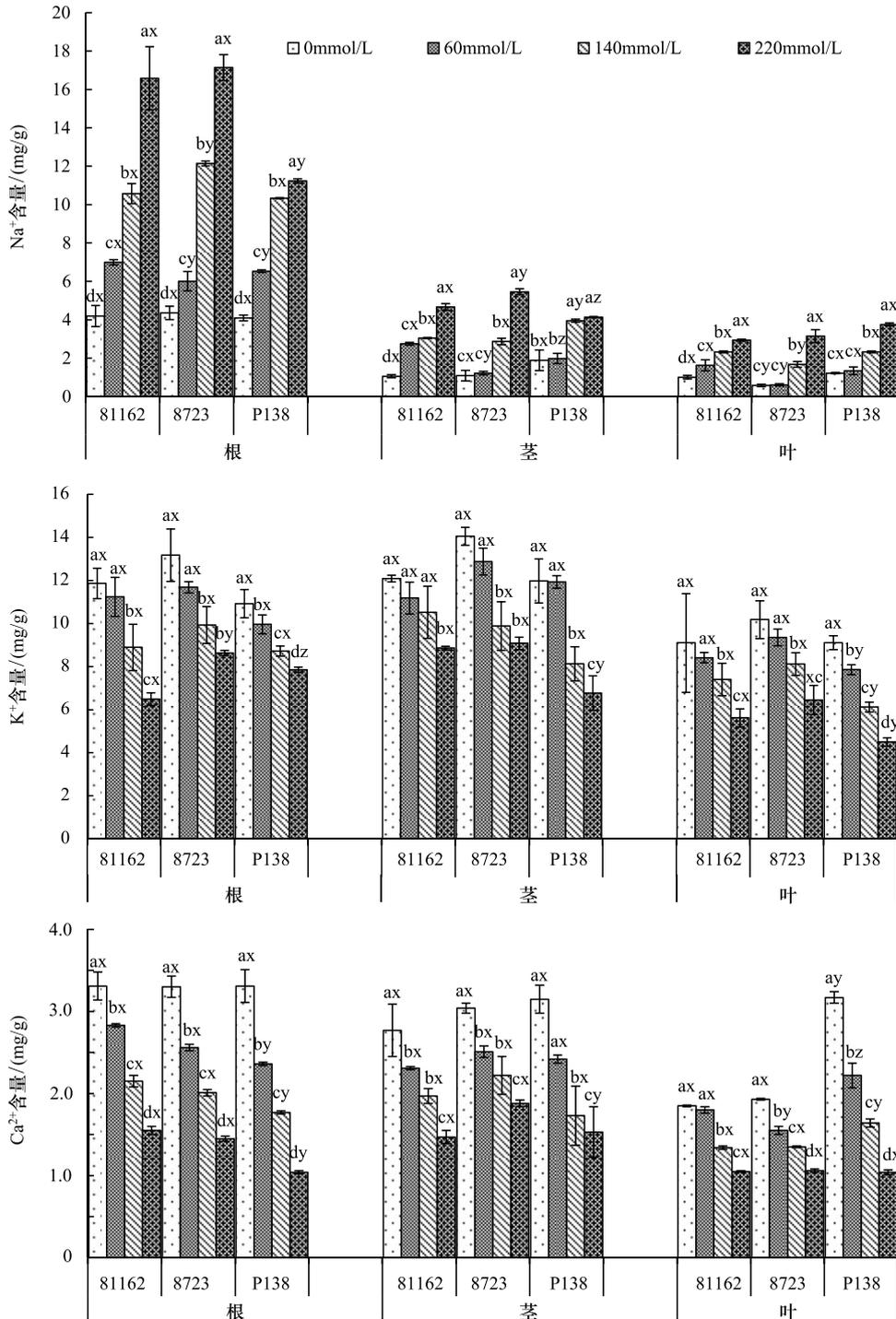


图 2 盐胁迫下不同玉米品种在幼苗中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  含量的变化

Fig. 2 Changes of  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{K}^+$  content in young seedlings of three maize inbred lines under different NaCl concentrations

为 68.58%, 茎中  $\text{Ca}^{2+}$  含量的下降幅度 81162 为 46.93%, 8723 为 38.15%, P138 为 51.43%, 叶片中  $\text{Ca}^{2+}$  含量的下降幅度 81162 为 43.24%, 8723 为 45.08%, P138 为 67.19%。由此可见,耐盐自交系根茎叶中  $\text{Ca}^{2+}$  含量降低幅度小于盐敏感自交系,因此能更好地维持各种代谢,保证玉米的正常发育。

### 2.3 萌动种子及幼苗中 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 比值的变化

如表 1 和表 2 所示,萌动种子和玉米幼苗各部位  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  均随着 NaCl 浓度的升高而降

低,与对照相比存在显著性差异。耐盐自交系 81162 和 8723 不管在萌动种子还是在幼苗中的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  都高于盐敏感自交系 P138,表明耐盐自交系通过渗透调节保持较高的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  比值,从而增强耐盐性。总体来看,萌动种子种胚中的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  高于种皮;幼苗中地上部分的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  高于地下部分,表明盐胁迫下种胚和地上部分能通过调节离子平衡维持相对较高的  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值,尽量保证光合器官和幼嫩组织少受盐害。

表 1 盐胁迫下不同玉米品种在萌动种子中  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  比值的变化

Table 1 Changes of  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  in germinating seeds of three maize inbred lines under different NaCl concentrations

种子部位 Part of seeds	NaCl 浓度/(mmol/L) NaClconcentration	$\text{K}^+/\text{Na}^+$			$\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$		
		81162	8723	P138	81162	8723	P138
种皮 Testa	0	7.79ax	5.96ay	4.89az	2.21ax	2.13ax	1.89ay
	60	2.02bx	1.96by	0.89bz	0.38bx	0.61by	0.19bz
	140	0.82cx	0.52cy	0.47cz	0.13cx	0.16cx	0.07cy
	220	0.38dx	0.26dy	0.22dz	0.08dx	0.10dy	0.04dz
胚乳 Endosperm	0	42.00ax	30.00ay	28.00az	3.05ax	3.70ax	2.27ay
	60	19.5bx	7.50by	6.67bz	1.43bx	0.64by	0.45bz
	140	4.07cx	4.33cx	2.92cy	0.32cx	0.31cx	0.20cy
	220	2.58dx	2.15dx	1.43dy	0.16dx	0.14dx	0.09dy
胚 Embryo	0	209.68ax	155.21ay	115.03az	2.42ax	1.96ay	0.87az
	60	71.62bx	39.42by	30.23bz	0.62bx	0.33by	0.27bz
	140	44.33cx	22.94cy	14.93cz	0.25cx	0.11cy	0.11cy
	220	25.58dx	15.72dy	8.34dz	0.13dx	0.07dy	0.04dz

表 2 盐胁迫下不同玉米品种在幼苗中  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  比值的变化

Table 2 Changes of  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  in young seedlings of three maize inbred lines under different NaCl concentrations

幼苗部位 Part of seedling	NaCl 浓度/(mmol/L) NaClconcentration	$\text{K}^+/\text{Na}^+$			$\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$		
		81162	8723	P138	81162	8723	P138
根 Root	0	2.82ax	3.02ay	2.66ax	0.79ax	0.76ax	0.81ax
	60	1.61bx	1.94by	1.53bx	0.40bx	0.43bx	0.36bx
	140	0.84cx	0.82cx	0.84cx	0.20cx	0.17cx	0.17cx
	220	0.39dx	0.56dy	0.70dz	0.09dx	0.08dx	0.09dx
茎 Root crown	0	5.87ax	12.89ay	6.34ax	1.34ax	2.79ay	1.67ax
	60	4.07bx	10.56by	6.03bz	0.84bx	2.06by	1.22bz
	140	3.45cx	3.44cx	2.06cy	0.65cx	0.77cx	0.44cy
	220	1.90dx	1.66dy	1.64dy	0.31dx	0.34dx	0.37dx
叶 Leaf	0	9.00ax	17.55ay	7.47az	1.83ax	3.33ay	2.6az
	60	5.16bx	15.33by	5.87bx	1.10bx	2.54by	1.66bz
	140	3.18cx	4.83cy	2.63cz	0.58cx	0.80cy	0.70cy
	220	1.91dx	2.05dy	1.20dz	0.36dx	0.34dx	0.28dy

### 3 讨论与总结

正常情况下,玉米细胞内各种离子的含量处于

相对平衡状态,从而维持正常的生理活动。植物受到盐胁迫时,细胞内离子平衡受破坏,生理功能紊乱。由于  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  有相似的离子半径和水合能,两

者之间会相互竞争转运体的同一结合位,  $\text{Na}^+$  往往利用  $\text{K}^+$  的途径进入植物体内,  $\text{Na}^+$  的含量显著增加,  $\text{Na}^+$  对  $\text{K}^+$  的吸收呈明显竞争性抑制<sup>[5,14,16-17]</sup>, 这一点在 3 个玉米自交系萌动种子和幼苗中得到了体现, 随着  $\text{NaCl}$  浓度的增加,  $\text{Na}^+$  含量增加, 而  $\text{K}^+$  含量降低。即玉米自交系对  $\text{K}^+$  的吸收明显受盐胁迫浓度的影响, 随盐胁迫浓度的增大, 其对  $\text{K}^+$  的吸收就减弱, 这是环境中高  $\text{Na}^+$  含量抑制了植物对  $\text{K}^+$  的吸收, 是  $\text{Na}^+$  对  $\text{K}^+$  的拮抗作用造成的<sup>[17-18]</sup>, 也就是说当外界环境存在大量  $\text{Na}^+$  的盐胁迫时, 质膜透性增强, 质膜对  $\text{K}^+$  的选择性降低。  $\text{Ca}^{2+}$  作为植物生长发育所需的重要营养元素, 对于维持盐胁迫植物正常生长具有十分重要的意义。已有研究表明, 液泡膜上存在 2 种  $\text{Ca}^{2+}$  通道, 当植物受到盐胁迫时,  $\text{Ca}^{2+}$  通道受诱导开放从液泡中释放出来, 与钙调蛋白或钙结合蛋白结合, 调节细胞代谢或基因表达, 促进植物适应逆境<sup>[19]</sup>。在盐胁迫下, 细胞质膜上  $\text{Ca}^{2+}$  可能被  $\text{Na}^+$  所取代, 降低了细胞膜的选择性和稳定性, 从而导致  $\text{Na}^+$  离子的大量进入和营养物质的外泄。

萌动种子, 3 个自交系种皮中  $\text{Na}^+$  含量高于种胚, 表明种子在高盐环境中将  $\text{Na}^+$  运输到种皮中保护种胚使其免受离子毒害, 确保在种子萌发期间的正常发育, 推测这是种子萌发期抵御逆境的机制。这与 Song 等<sup>[13]</sup>报道的结果相一致。胚中的  $\text{K}^+$  含量高于种皮, 表明胚选择性吸收  $\text{K}^+$  而排斥  $\text{Na}^+$ , 利用较高浓度的  $\text{K}^+$  浓度进行渗透调节, 以提高其抗盐性, 避免使种胚受到伤害。玉米幼苗中根中的  $\text{Na}^+$  含量高于茎中的  $\text{Na}^+$  含量, 茎中的  $\text{Na}^+$  含量高于叶中的  $\text{Na}^+$  含量, 可见玉米幼苗主要将  $\text{Na}^+$  储存在根部, 阻止其往上运输, 减少对地上部分的伤害。这与钟小仙等<sup>[20]</sup>、高学芳等<sup>[14]</sup>、王丽燕和赵可夫<sup>[21]</sup>报道的结果一致。

萌动种子中 81162 和 8723 中的  $\text{Na}^+$  增加幅度和含量小于 P138, 表明耐盐自交系 81162 和 8723 的拒  $\text{Na}^+$  能力较强, 而盐敏感自交系 P138 的拒  $\text{Na}^+$  能力较弱, 从而在体内聚集了过多的  $\text{Na}^+$ ; 尤其是盐敏感自交系 P138 体内有过多的  $\text{Na}^+$  流向胚部, 从而造成对胚的伤害, 影响了种子的萌发。胚和种皮中, 耐盐自交系 81162 和 8723 中  $\text{K}^+$  离子的降低幅度小于盐敏感自交系 P138, 表明耐盐自交系能通过选择性的吸收  $\text{K}^+$ , 而排斥  $\text{Na}^+$ , 利用较高的  $\text{K}^+$  浓度, 维持较高

的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  来进行渗透调节, 以提高其抗盐性。这一结果与萌动种子中耐盐自交系 81162 和 8723 相对盐敏感自交系 P138 有较高的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  的结果相一致, 因而有较高的耐盐性。Zhu<sup>[22]</sup>指出  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  的高低作为许多植物较为可靠的耐盐指标, 本研究结果进一步印证了这一结论; 同时也充分说明了耐盐自交系 81162 和 8723 将更多的  $\text{K}^+$  积累在胚部, 从而使胚的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值升高, 从而提高了萌发期的耐盐性。

耐盐自交系 81162 和 8723 根和茎中的  $\text{Na}^+$  含量大于盐敏感自交系 P138, 而在叶中则小于盐敏感自交系 P138。说明耐盐自交系 81162 和 8723 能够将吸收的  $\text{Na}^+$  较多地积累在根茎部, 阻止其向上运输, 从而使其叶片中的  $\text{Na}^+$  含量降低, 减少  $\text{Na}^+$  对地上部的伤害。而盐敏感自交系 P138 根和茎中较多的  $\text{Na}^+$  流向叶部, 导致叶片中的  $\text{Na}^+$  含量升高, 从而造成了对叶片的伤害。这与前人报道的结果相一致<sup>[23,24]</sup>。高盐胁迫下耐盐自交系 81162 和 8723 根中  $\text{K}^+$  含量的降低幅度大于盐敏感自交系 P138, 而茎和叶中  $\text{K}^+$  含量的降低幅度小于盐敏感自交系 P138, 这与 Godfrey 等<sup>[25]</sup>的研究结果相似。表明耐盐自交系 81162 和 8723 根部向茎、叶选择性运输更多  $\text{K}^+$  含量, 抑制  $\text{Na}^+$  向茎、叶的运输, 地上部  $\text{Na}^+$  含量下降, 以维持较高的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  来进行渗透调节, 从而提高耐盐性。但是耐盐自交系 81162 和 8723 根茎中的  $\text{Ca}^{2+}$  含量大于盐敏感自交系 P138, 叶片中的  $\text{Ca}^{2+}$  含量则小于盐敏感自交系 P138, 具体的原因仍不清楚。李品芳和杨志成<sup>[26]</sup>、朱小梅等<sup>[27]</sup>报道耐盐品种中较高的  $\text{Ca}^{2+}$  含量可以促进其茎部对  $\text{K}^+$  的选择性吸收, 将  $\text{Na}^+$  截流于根部, 提高茎叶中  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ , 来进行渗透调节, 提高了耐盐品种的耐盐胁迫能力。这一说法在本试验中也得到了证实。本研究中,  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  在叶片中高于茎, 茎中高于根部, 耐盐自交系 81162 和 8723 高于盐敏感自交系 P138。表明在  $\text{NaCl}$  胁迫下, 玉米耐盐自交系能够通过离子平衡维持相对较高的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值, 从而保持较高的耐盐性, 使其少受盐害。这再一次证实了 Zhu<sup>[22]</sup>指出的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值是衡量植物耐盐性的一个重要指标的结论。至此, 耐盐自交系 81162 和 8723 与盐敏感自交系 P138 的耐盐性在萌发期和幼苗生长期是一致的, 并且其耐盐性机制通过萌发期和早期幼苗不同部位  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  含量及比值的变化得到了解释。

## References:

- [ 1 ] Zhang Y F, Yin B. Advances in study of salt-stress tolerance in maize. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 83-85.
- [ 2 ] Tang H, Liu X L, Luo Q Y. A primary study on early stage screening system for maize salt tolerance. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2007, 25(2): 169-172, 176-176.
- [ 3 ] Niu X, Bressan R A, Hasegawa P M, Pardo J M. Ion homeostasis in NaCl stress environments. *Plant Physiology*, 1995, 109(3): 735-742.
- [ 4 ] Ramoliya P J, Patel H M, Pandey A N. Effect of salinization of soil on growth and macro- and micro-nutrient accumulation in seedlings of *Salvadora persica* (*Savadoraceae*). *Forest Ecology and Management*, 2004, 202(1-3): 181-193.
- [ 5 ] Schroeder J I, Ward J M, Gassmann W. Perspectives on the physiology and structure of inward rectifying  $K^+$  channels in higher plants: biophysical implications for  $K^+$  uptake. *Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure*, 1994, 23(1): 441-471.
- [ 6 ] Drew M C, Läuchli A. Oxygen-dependent exclusion of sodium ions from shoots by roots of *Zea mays* (cv Pioneer 3906) in relation to salinity damage. *Plant Physiology*, 1985, 79(1): 171-176.
- [ 7 ] Ma H Y, Liang Z W, Kong X J, Yan C, Chen Y. Effects of salinity, temperature and their interaction on the germination percentage and seedling growth of *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. (*Poaceae*). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4710-4717.
- [ 8 ] Khan M A, Guhar S. Germination responses of *Sporobolusiolados*; a saline desert grass. *Journal of Arid Environments*, 2003, 53(3): 387-394.
- [ 9 ] Flowers T J, Hajibagheri M A, Yeo A R. Ion accumulation in the cell walls of rice plants growing under saline conditions: evidence for the Oertli hypothesis. *Plant Cell Environments*, 1991, 14(3): 319-325.
- [ 10 ] Bagci S A, Ekiz H, Yilmaz A. Salt tolerance of sixteen wheat genotypes during seedling growth. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2007, 31: 363-372.
- [ 11 ] Wang L Y, Zhao K F. Some physiological response of *zea mays* under salt-stress. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(2): 264-266.
- [ 12 ] An P, Inanaga S, Cohen Y, Kafkafi U, Sugimoto Y. Salt tolerance in two soybean cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(3): 407-423.
- [ 13 ] Song J, Feng G, Tian C Y, Zhang F S. Strategies for adaptation of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to a saline environment during seed-germination stage. *Annals of Botany*, 2005, 96(3): 399-405.
- [ 14 ] Shang X F, Dong S T, Zheng S Y, Wang L Y. Relationship between changes of  $Na^+$ ,  $K^+$ , and  $Ca^{2+}$  contents during seed germination and salt tolerance in maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(2): 333-336.
- [ 15 ] Peng Y L, Li W L, Wang K Z, Wang H N. Effects of salt stress on seed germination and seedlings growth of salt-tolerant line and salt-sensitive line of maize. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4): 62-71.
- [ 16 ] Jing Y X, Yuan Q H. Effects of salt stress on seedling growth of alfalfa (*Medicago sativa*) and ion distribution in different alfalfa organs. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(2): 134-139.
- [ 17 ] Parida A K, Das A B, Mitra B. Effects of salt on growth, ion accumulation, photosynthesis and leaf anatomy of the mangrove, *Bruguiera parviflora*. *Trees-Structure and Function*, 2004, 18(2): 167-174.
- [ 18 ] Syed M A. Nutrient uptake by plants under stress conditions. In: Pessaraki M. *Handbook of Plant and Crop Stress*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1999: 295-296.
- [ 19 ] Liu Z W, Zhong X X, Chang P P, Liu W G. Cationic distribution and transportation in different organs of *Pennisetum purpureum* cv. Sumu No. 2 seedling under sea-salt stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(5): 237-247.
- [ 20 ] Zhong X X, Zhang J L, Zhang G Z, Liu Z W. Growth of somatic cell mutants of *napiier grass* and distribution of  $K^+$  and  $Na^+$  at seedling stage under Sea-salt stress. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32(1): 48-52.
- [ 21 ] Wang L Y, Zhao K F. Effect of NaCl stress on ion compartmentation, photosynthesis and growth of *Salicornia bigelovii* Torr. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30(1): 94-98.
- [ 22 ] Zhu J K. Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology*, 2003, 6(5): 441-445.
- [ 23 ] Mac Robbie E A C. Signalling in guard cells and regulation of ion channel activity. *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48: 515-528.
- [ 24 ] Carpici E B, Celik N, Bayram G, Asik B B. The effect of salt stress on the growth, biochemical parameter and minral element content of some maize (*Zea mays* L.) cultivars. *African Journal Biotechnology*, 2010, 9(41): 6937-6942.
- [ 25 ] Netondo G W, Onyango J C, Beck E. Sorghum and salinity: I. Response of growth, water relations and ion accumulation to NaCl salinity. *Crop Science*, 2004, 44(3): 797-805.
- [ 26 ] Li P F, Yang Z C. Dynamic effect of NaCl on absorption and transportation of  $K^+$  and  $Na^+$  in *Festuca arundinacea*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(4): 58-64.
- [ 27 ] Zhu X M, Hong L Z, Wang M W, Ding H R, Liu C, Wu J W. Absorption and transportation of ions in crops under NaCl stress. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010, (4): 1-4.

## 参考文献:

- [ 1 ] 张永峰, 殷波. 玉米耐盐性研究进展. *玉米科学*, 2008, 16(6): 83-85.

- [ 2 ] 汤华, 柳晓磊, 罗秋芸. 玉米耐盐早期筛选体系的初步研究. 海南大学学报: 自然科学版, 2007, 25(2): 169-172, 176-176.
- [ 7 ] 马红媛, 梁正伟, 孔祥军, 闫超, 陈渊. 盐分、温度及其互作对羊草种子发芽率和幼苗生长的影响. 生态学报, 2008, 28(10): 4710-4717.
- [ 11 ] 王丽燕, 赵可夫. 玉米幼苗对盐胁迫的生理响应. 作物学报, 2005, 31(2): 264-266.
- [ 14 ] 商学芳, 董树亭, 郑世英, 王丽燕. 玉米种子萌发过程中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量变化与耐盐性的关系. 作物学报, 2008, 34(2): 333-336.
- [ 15 ] 彭云玲, 李伟丽, 王坤泽, 王汉宁. NaCl 胁迫对玉米耐盐系与盐敏感系萌发和幼苗生长的影响. 草业学报, 2012, 21(4): 62-71.
- [ 16 ] 景艳霞, 袁庆华. NaCl 胁迫对苜蓿幼苗生长及不同器官中盐离子分布的影响. 草业学报, 2011, 20(2): 134-139.
- [ 19 ] 刘智微, 钟小仙, 常盼盼, 刘伟国. 海盐胁迫下苏牧 2 号象草幼苗不同器官中阳离子分配与运输. 草业学报, 2012, 21(5): 237-247.
- [ 20 ] 钟小仙, 张建丽, 张国正, 刘智微. 海盐胁迫下象草体细胞突变体苗期生长及  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  分配. 中国草地学报, 2010, 32(1): 48-52.
- [ 21 ] 王丽燕, 赵可夫. NaCl 胁迫对海蓬子 (*Salicornia bigelovii* Torr.) 离子区室化、光合作用和生长的影响. 植物生理与分子生物学报, 2004, 30(1): 94-98.
- [ 26 ] 李品芳, 杨志成. NaCl 胁迫下对高羊茅生长及  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  吸收与运输的动态变化. 草业学报, 2005, 14(4): 58-64.
- [ 27 ] 朱小梅, 洪立洲, 王茂文, 丁海荣, 刘冲, 吴家旺. NaCl 胁迫下作物对离子的吸收及分配. 中国土壤与肥料, 2010, (4): 1-4.